

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-142095

(43)Date of publication of application : 20.05.2004

(51)Int.Cl.

B25J 5/00  
B25J 13/08

(21)Application number : 2003-342766

(71)Applicant : SONY CORP

(22)Date of filing : 01.10.2003

(72)Inventor : NAGASAKA KENICHIRO

(30)Priority

Priority number : 2002288745

Priority date : 01.10.2002

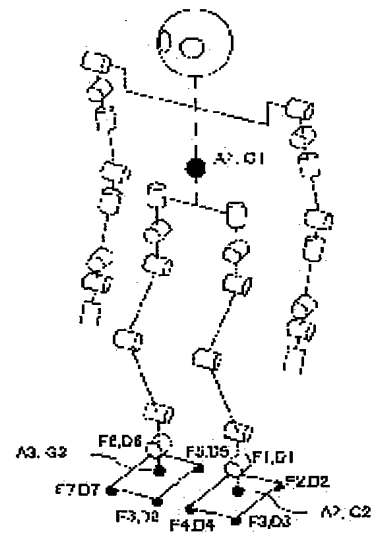
Priority country : JP

## (54) ROBOT SYSTEM AND CONTROL METHOD THEREFOR

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To make it possible to execute calculations in real time on an actual robot that generate a walking pattern of the robot where parameters such as boundary conditions of motion state quantities, external forces, external force moments, sole paths and so on can be set.

**SOLUTION:** A walking control system is composed so that real world physical values of the robot such as the motion state quantities, the external forces, the external force moments and environmental shapes measured by sensors and others are input. By consolidating all calculations for balance maintenance of the robot into a single walking pattern calculation, a walking pattern generating function and an adaptive control function can efficiently work together and also the consistency of dynamic models is assured and the interference between the respective dynamic models is removed.



(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-142095

(P2004-142095A)

(43) 公開日 平成16年5月20日(2004.5.20)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

B 2 5 J 5/00

B 2 5 J 13/08

F I

B 2 5 J 5/00

B 2 5 J 5/00

B 2 5 J 13/08

F

E

Z

テーマコード(参考)

3 C 0 0 7

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 31 頁)

(21) 出願番号 特願2003-342766 (P2003-342766)  
 (22) 出願日 平成15年10月1日(2003.10.1)  
 (31) 優先権主張番号 特願2002-288745 (P2002-288745)  
 (32) 優先日 平成14年10月1日(2002.10.1)  
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

(71) 出願人 000002185  
 ソニー株式会社  
 東京都品川区北品川6丁目7番35号  
 (74) 代理人 100093241  
 弁理士 宮田 正昭  
 (74) 代理人 100101801  
 弁理士 山田 英治  
 (74) 代理人 100086531  
 弁理士 澤田 俊夫  
 (72) 発明者 長阪 憲一郎  
 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソ  
 ニー株式会社内  
 Fターム(参考) 3C007 CS08 KS23 KS34 KS36 KX02  
 KX12 LS15 LW08 MT05 WA03  
 WA13 WB05 WB07

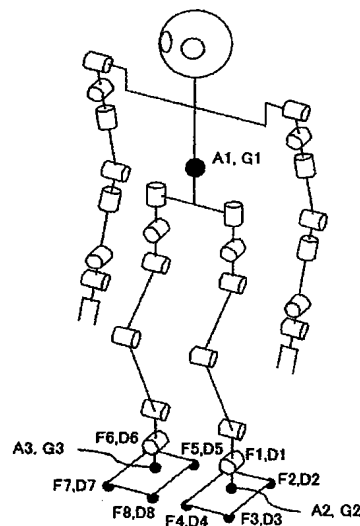
(54) 【発明の名称】 ロボット装置及びロボット装置の制御方法

## (57) 【要約】

【課題】 ロボットの歩行パターン生成演算を、運動状態量に関する境界条件、外力、外力モーメント、足底軌道などのパラメータが設定可能な形式で、実機上で実時間により実行可能にする。

【解決手段】 センサなどから計測されたロボットの運動状態量、外力及び外力モーメント、環境形状などの実世界の物量を入力するように歩行制御系を構成する。機体のバランス維持に係るすべての計算を単一の歩行パターン演算に集約させることにより、歩容生成機能と適応制御機能を効率的に両立させるとともに、力学モデルの一貫性を保証し、各力学モデル間の干渉を取り除く。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

移動手段を有するロボット装置であって、  
前記ロボット装置の状態量を検出する状態検出手段と、  
前記ロボット装置の状態量に関する境界条件付き運動方程式の解を求める実時間運動方程式求解手段と、  
前記状態検出手段により検出された現在の状態量を、前記境界条件付き運動方程式の境界条件として設定する境界条件設定手段と、  
前記設定された境界条件の下で、前記実時間運動方程式求解手段が算出した運動方程式の解に基づいて、前記ロボット装置の次時刻の目標状態量を算出する目標状態量算出手段と、  
前記目標状態量に基づいて、前記ロボット装置の運動パターンを生成する運動パターン生成手段と、  
を具備することを特徴とするロボット装置。

**【請求項 2】**

前記現在の状態量は現在の制御サイクルにおける前記ロボット装置の状態量であり、次時刻の目標状態量は次の制御サイクルにおける前記ロボット装置の目標状態量である、ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置。

**【請求項 3】**

前記状態検出手段は、前記ロボット装置の状態量として、前記ロボット装置の重心位置又は重心位置の N 階微分値を用いる、ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置。

**【請求項 4】**

前記実時間運動方程式求解手段は、前記運動方程式として ZMP 方程式を用いる、ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置。

**【請求項 5】**

前記移動手段は、可動部とリンクとからなる脚で構成され、  
前記脚の先端リンクの位置又は姿勢に関する軌道を制御周期毎に計算する実時間軌道生成手段と、

前記ロボット装置の周辺環境の状況を計測する環境状況計測手段と、  
をさらに備え、

前記実時間軌道生成手段は、前記環境状況計測手段によって計測された実環境状況に基づいて、前記先端リンクの位置と姿勢を算出し、

前記運動パターン生成手段は、前記先端リンクの位置と姿勢、及び前記目標状態量に基づいて前記ロボット装置の運動パターンを生成する、  
ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置。

**【請求項 6】**

前記ロボット装置に作用する外力又はモーメントを検出する外力検出手段をさらに備え、

前記実時間運動方程式求解手段は、前記外力検出手段が算出した外力又はモーメントを加味して、前記運動方程式の解を算出する、  
ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置

**【請求項 7】**

移動手段を有するロボット装置の制御方法であって、  
前記ロボット装置の状態量を検出する状態検出ステップと、  
前記ロボット装置の状態量に関する境界条件付き運動方程式の解を求める実時間運動方程式求解ステップと、

前記状態検出ステップにおいて検出された現在の状態量を、前記境界条件付き運動方程式の境界条件として設定する境界条件設定ステップと、

前記設定された境界条件の下で、前記実時間運動方程式求解ステップにおいて算出した

運動方程式の解に基づいて、前記ロボット装置の次時刻の目標状態量を算出する目標状態量算出ステップと、

前記目標状態量に基づいて、前記ロボット装置の運動パターンを生成する運動パターン生成ステップと、

を具備することを特徴とするロボット装置の制御方法。

【請求項 8】

前記現在の状態量は現在の制御サイクルにおける前記ロボット装置の状態量であり、次時刻の目標状態量は次の制御サイクルにおける前記ロボット装置の目標状態量である、ことを特徴とする請求項 7 に記載のロボット装置の制御方法。

【請求項 9】

前記状態検出ステップでは、前記ロボット装置の状態量として、前記ロボット装置の重心位置又は重心位置の N 階微分値を用いる、ことを特徴とする請求項 7 に記載のロボット装置の制御方法。

【請求項 10】

前記実時間運動方程式求解ステップでは、前記運動方程式として ZMP 方程式を用いることを特徴とする請求項 7 に記載のロボット装置の制御方法。

【請求項 11】

前記移動手段は可動部とリンクとからなる脚で構成され、

前記脚の先端リンクの位置又は姿勢に関する軌道を制御周期毎に計算する実時間軌道生成ステップと、

前記ロボット装置の周辺環境の状況を計測する環境状況計測ステップと、  
をさらに備え、

前記実時間軌道生成ステップでは、前記環境状況計測ステップにおいて計測された実環境状況に基づいて、前記先端リンクの位置と姿勢を算出し、

前記運動パターン生成ステップでは、前記先端リンクの位置と姿勢、及び前記目標状態量に基づいて前記ロボット装置の運動パターンを生成する、  
ことを特徴とする請求項 7 に記載のロボット装置の制御方法。

【請求項 12】

前記ロボット装置に作用する外力又はモーメントを検出する外力検出ステップをさらに備え、

前記実時間運動方程式求解ステップでは、前記外力検出ステップにおいて算出した外力又はモーメントを加味して、前記運動方程式の解を算出する、  
ことを特徴とする請求項 7 に記載のロボット装置の制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、少なくとも複数本の可動脚を備えたロボット装置及びロボット装置の制御方法に係り、特に、所定の力学モデルを用いて歩容生成並びに適応制御を行なうロボット装置及びロボット装置の制御方法に関する。

【0002】

さらに詳しくは、本発明は、歩行パターンを始めとする運動パターン生成を実機上で実時間により行なうロボット装置及びロボット装置の制御方法に係り、特に、歩行パターン生成と各種の適応制御のための力学モデルの一貫性を保証して良好な歩行制御を行なうロボット装置及びロボット装置の制御方法に関する。

【背景技術】

【0003】

電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置のことを「ロボット」という。ロボットの語源は、スラブ語の“ROBOTA（奴隷機械）”に由来すると言われている。わが国では、ロボットが普及し始めたのは 1960 年代末からで

10

20

30

40

50

あるが、その多くは、工場における生産作業の自動化・無人化などを目的としたマニピュレータや搬送ロボットなどの産業用ロボット (industrial robot) であつた。

#### 【0004】

最近では、ヒトやサルなどの2足直立歩行を行なう動物の身体メカニズムや動作を模した脚式移動ロボットに関する研究開発が進展し、実用化への期待も高まってきている。2足直立による脚式移動は、クローラ式や、4足又は6足式などに比し不安定で姿勢制御や歩行制御が難しくなるが、不整地や障害物など作業経路上に凹凸のある歩行面や、階段や梯子の昇降など不連続な歩行面に対応することができるなど、柔軟な移動作業を実現できるという点で優れている。

10

#### 【0005】

また、ヒトの生体メカニズムや動作を再現した脚式移動ロボットのことを、特に、「人間形」、若しくは「人間型」のロボット (humanoid robot) と呼ぶ。人間型ロボットは、例えば、生活支援、すなわち住環境その他の日常生活上のさまざまな場面における人的活動の支援などを行なうことができる。

#### 【0006】

人間の作業空間や居住空間のほとんどは、2足直立歩行という人間が持つ身体メカニズムや行動様式に合わせて形成されており、車輪その他の駆動装置を移動手段とした現状の機械システムが移動するには多くの障壁が存在する。したがって、機械システムすなわちロボットがさまざまな人的作業を代行し、さらに人間の住空間に深く浸透していくためには、ロボットの移動可能範囲が人間のそれとほぼ同じであることが好ましい。これが、脚式移動ロボットの実用化が大いに期待されている所以でもある。

20

#### 【0007】

2足の脚式移動ロボットに関する姿勢制御や安定歩行に関する技術は既に数多提案されている。ここで言う安定な「歩行」とは、「転倒することなく、脚を使って移動すること」と定義することができる。ロボットの姿勢安定制御は、ロボットの転倒を回避する上で非常に重要である。何故ならば、転倒は、ロボットが実行中の作業を中断することを意味し、且つ、転倒状態から起き上がって作業を再開するために相当の労力や時間が払われるからである。また、転倒によって、ロボット本体自体、あるいは転倒するロボットと衝突する相手側の物体にも、致命的な損傷を与えてしまう危険があるからである。

30

#### 【0008】

脚式移動ロボットの姿勢安定制御や歩行時の転倒防止に関する提案の多くは、ZMP (Zero Moment Point) を歩行の安定度判別の規範として用いている。ZMPによる安定度判別規範は、歩行系から路面には重力と慣性力、並びにこれらのモーメントが路面から歩行系への反作用としての床反力並びに床反力モーメントとバランスするという「ダランベールの原理」に基づく。力学的推論の帰結として、足底接地点と路面の形成する支持多角形 (すなわちZMP安定領域) の辺上あるいはその内側にピッチ軸及びロール軸モーメントがゼロとなる点、すなわち「ZMP (Zero Moment Point)」が存在する。

#### 【0009】

要約すれば、ZMP規範とは、「歩行のあらゆる瞬間において、ZMPが足部と路面とが形成する支持多角形の内側に存在し、且つ、ロボットが路面に押す方向の力が作用すれば、ロボットが転倒 (機体が回転運動) することなく安定に歩行できる」とするものである (例えば、非特許文献1を参照のこと)。

40

#### 【0010】

ZMP規範に基づく運動パターン (例えば、2足歩行パターン) 生成によれば、足底着地点をあらかじめ設定することができ、路面形状に応じた足先の運動学的拘束条件を考慮し易いなどの利点がある。また、ZMPを安定度判別規範とすることは、力ではなく軌道を運動制御上の目標値として扱うことを意味するので、技術的に実現可能性が高まる。

#### 【0011】

50

例えば、脚式移動ロボットは、ZMPがゼロとなる床面上の点を目標値に一致させるようにして安定歩行を行なうようにすることができる（例えば、特許文献1を参照のこと）。

#### 【0012】

また、脚式移動ロボットは、ZMPが支持多面体（多角形）内部、又は、着地、離床時にZMPが支持多角形の端部から少なくとも所定の余裕を有する位置にあるように構成することができる（例えば、特許文献2を参照のこと）。この場合、外乱などを受けても所定距離だけZMPの余裕があり、歩行時の機体の安定性が向上する。

#### 【0013】

また、脚式移動ロボットの歩き速度をZMP目標位置によって制御することができる（10  
例えば、特許文献3を参照のこと）。すなわち、あらかじめ設定された歩行パターン・データを用い、ZMPを目標位置に一致させるように脚部関節を駆動するとともに、上体の傾斜を検出してその検出値に応じて設定された歩行パターン・データの吐き出し速度を変更する。未知の凹凸を踏んでロボットが例えば前傾するときは、吐き出し速度を速めることで姿勢を回復することができる。またZMPを目標位置に制御するので、両脚支持期で吐き出し速度を変更しても支障がない。

#### 【0014】

また、脚式移動ロボットの着地位置をZMP目標位置によって制御することができる（  
例えば、特許文献4を参照のこと）。すなわち、同公報に記載の脚式移動ロボットは、Z  
MP目標位置と実測位置とのずれを検出し、それを解消するように脚部の一方又は双方を 20  
駆動するか、又はZMP目標位置まわりにモーメントを検出してそれが零になるように脚部を駆動することで、安定歩行を実現する。

#### 【0015】

また、脚式移動ロボットの傾斜姿勢をZMP目標位置によって制御することができる（  
例えば、特許文献5を参照のこと）。すなわち、ZMP目標位置まわりのモーメントを検出し、モーメントが生じたときは、それが零になるように脚部を駆動することで安定歩行を行なう。

#### 【0016】

ところで、ZMP方程式の数値解法などを含む運動パターン生成の処理負荷は高い。このため、従来の一般的な歩行制御方式の多くは、基準歩行パターン生成演算をオフライン 30  
で実行するとともに、未知路面・未知外力に適応するための安定化演算は各適応制御機能毎に比較的計算負荷の軽い簡略力学モデルを構成して実機上で実行するようになっている。

#### 【0017】

このような場合、基準歩行パターンが固定的なデータとして与えられるため、多様な歩容変化要求が受け付けられないという問題がある。歩行ロボットが実環境中を自由に移動可能とするためには、任意のタイミングで入力される歩幅・歩行周期・旋回角・足上げ高さなどの下肢の運動変化要求や、上肢の運動変化要求を満足するよう、力学的バランス平衡を保ったまま即応的に全身運動を再計画する機能が必要である。ところが、オフラインで生成歩行パターンを生成する従来方式では、あらかじめ用意しておいた歩行パターンを 40  
実環境上でそのまま実行することしかできない。

#### 【0018】

例えば、オフラインで一步分の歩行パターンを幾つか用意しておき、それらを混合・接続する方法も提案されている（例えば、特許文献6を参照のこと）。しかしながら、殆ど無限に存在するといつてよい歩行パターンのすべてをカバーすることは困難である。

#### 【0019】

また、基準歩行パターン生成時に仮定したのとは異なる運動が特定関節（例えば人間型ロボットの 50  
上肢）に対して実行時に要求された場合、この特定関節の運動は外乱として扱われるため、安定化アルゴリズムへの負担が大きくなる、という問題がある。特定関節への要求運動と基準歩行パターン生成時に仮定した運動の偏差が過大な場合には、安定化アル

ゴリズムの許容範囲を超え、転倒に至るケースもある。例えば、上肢の質量が大きい場合、歩行中の任意のタイミングで激しく上肢を振るなどの運動要求に対応することは難しいと思料される。

#### 【0020】

また、適応制御機能毎の簡略化された力学モデルを構成しているため、適応制御機能の追加の拡張性に乏しく、演算量が嵩むという問題がある。各適応制御機能毎の安定化アルゴリズムは、歩行の安定化という共通の目的を持ち、本質的に類似した計算を行なっていることが多い。計算リソースの限られた組込みCPU上では、これらの演算を集約し、演算の節約を図っていくことが重要となる。

#### 【0021】

また、実機上での安定化演算の計算負荷を軽減するために各適応制御毎に簡略化した力学モデルを区々に導入することが多いが、言い換えれば、歩行パターン生成及び各種安定化アルゴリズムの中で用いている力学モデルが一貫していない。このため、異モデル間の不用意な干渉を生じることがある。このような干渉は制御系において発振・発散という現象を招来し、歩行性能の低下を招く可能性が否めない。歩行パターン生成を含め、各種安定化アルゴリズムは各々独立なダイナミクスによって支配されている訳ではなく、一般に相互干渉を有するので、相互干渉性を考慮した一貫性のある力学モデルを共有し、動作することが望ましい。

#### 【0022】

【非特許文献1】Mi omir Vukobratovic 著“LEGGED LOCOMOTION ROBOTS”（加藤一郎外著『歩行ロボットと人工の足』（日刊工業新聞社））

【特許文献1】特開平5-305579号公報

【特許文献2】特開平5-305581号公報

【特許文献3】特開平5-305583号公報

【特許文献4】特開平5-305585号公報

【特許文献5】特開平5-305586号公報

【特許文献6】特開平10-86081号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

#### 【0023】

本発明の目的は、歩行パターンを始めとする運動パターン生成を実機上で実時間により好適に行なうことができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することにある。

#### 【0024】

本発明のさらなる目的は、歩行パターン生成と各種の適応制御のための力学モデルの一貫性を保証して良好な歩行制御を行なうことができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することにある。

#### 【0025】

本発明のさらなる目的は、計算リソースの限られた組込みCPU上で機体の安定化制御を好適に行なうことができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することにある。

#### 【0026】

本発明のさらなる目的は、各適応制御機能間で相互干渉性を考慮した一貫性のある力学モデルを共有して歩行性能を向上することができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

#### 【0027】

本発明は、上記課題を参酌してなされたものであり、移動手段を有するロボット装置であって、

10

20

30

40

50

前記ロボット装置の状態量を検出する状態検出手段と、

前記ロボット装置の状態量に関する境界条件付き運動方程式の解を求める実時間運動方程式求解手段と、

前記状態検出手段により検出された現在の状態量を、前記境界条件付き運動方程式の境界条件として設定する境界条件設定手段と、

前記設定された境界条件の下で、前記実時間運動方程式求解手段が算出した運動方程式の解に基づいて、前記ロボット装置の次時刻の目標状態量を算出する目標状態量算出手段と、

前記目標状態量に基づいて、前記ロボット装置の運動パターンを生成する運動パターン生成手段と、

を具備することを特徴とするロボット装置である。

#### 【0028】

本発明に係るロボット装置によれば、ユーザ・プログラムからの運動変更要求を、力学的バランス平衡を維持したまま即応的に満足する実時間全身運動再計画の機能を備えているので、現在のロボットの実状態、実環境形状、外力など実世界情報を反映することができる。

#### 【0029】

すなわち、未知環境適応に関する安定化のための演算を別途行なうことなく、ロボットの実状態、実環境形状、外力を実時間全身運動再計画演算の境界値や拘束条件として入力することで、一回の実時間全身運動再計画演算内で歩行パターンなどの運動パターン生成演算と安定化演算の演算共有化を実現することができる。

#### 【0030】

これにより、ロボットの歩行安定化制御に必要なとなる演算量を節約することができるので、計算リソースの限られた組込みCPU上でも、柔軟な運動要求反映機能とロバスト性を兼ね備えた高機能全身運動制御系を構築することが可能となる。

#### 【0031】

一般に、歩行パターン生成や種々の安定化で用いられる力学モデルが相異なると、力学モデル間の不用意な干渉を生じて歩行性能の低下につながる可能性が否定できない。これに対し、本発明に係る移動ロボットの制御方式では、力学演算は単一の歩行パターン生成演算内で一貫して行なわれるため、このような種々のアルゴリズム間の不用意な干渉が生じ難く、良好な歩行性能を得ることができる。

#### 【0032】

ロボットの運動方程式は、単純な式で表現されるが、変係数の微分方程式であり、解析解を求めることは容易でない。そこで、比較的短期間の時間間隔を考えて、所定の仮定の下で各短期区間毎に簡潔な常微分方程式に近似して、これら短期区間が複数連なっているとモデル化して、演算処理を簡素化する。扱いが容易な短期区間の取り方として、片脚支持期と両脚支持期の境界で区間を区切る例を挙げることができる。

#### 【0033】

ここで、前記現在の状態量は現在の制御サイクルにおける前記ロボット装置の状態量のことであり、次時刻の目標状態量は次の制御サイクルにおける前記ロボット装置の目標状態量のことである。

#### 【0034】

また、前記状態検出手段は、前記ロボット装置の状態量として、上記ロボットの重心位置又は重心位置のN階微分値を用いるようにしてもよい。

#### 【0035】

あるいは、前記状態検出手段は、前記ロボット装置の状態量として、ロボットの重心に近接した部位の位置、又はそのN階微分値のいずれかを用いるようにしてもよい。

#### 【0036】

例えばロボット装置の状態量として、機体の重心位置  $x$ 、重心速度  $dx/dt$  からなる2次元の状態ベクトル  $[x, dx/dt]^T$  を用いることができる。あるいは、2足直立

10

20

30

40

50



歩行のロボットの場合、腰部などの重心近傍の特定部位の位置  $p$ 、速度  $dp/dt$  からなる 2 次元の状態ベクトル  $[p, dp/dt]^T$ 、全身の質点位置  $p_i$ 、速度  $dp_i/dt$  ( $i$  は質点のインデックスで、 $i = 1 \dots N$ ) からなる  $2N$  次元ベクトル  $[p_1, p_2, \dots, p_N, dp_1/dt, dp_2/dt, \dots, dp_N/dt]^T$  などを状態量として用いても良い。

【0037】

また、前記実時間運動方程式求解手段は、ロボットの ZMP 方程式を運動方程式として用いるようにしてもよい。

【0038】

ここで、前記移動手段は、例えば可動部とリンクとからなる脚で構成される。このような場合、前記脚の先端リンクの位置又は姿勢に関する軌道を制御周期毎に計算する実時間軌道生成手段と、前記ロボット装置の周辺環境の状況を計測する環境状況計測手段とをさらに備えていてもよい。そして、前記実時間軌道生成手段は、前記環境状況計測手段によって計測された実環境状況に基づいて、前記先端リンクの位置と姿勢を算出し、前記運動パターン生成手段は、前記先端リンクの位置と姿勢、及び前記目標状態量に基づいて前記ロボット装置の運動パターンを生成することができる。

【0039】

また、本発明に係るロボット装置は、実際のロボットに作用する外力又は外モーメントを計測する外力検出手段をさらに備えていてもよい。このような場合、前記実時間運動方程式求解手段は、前記外力検出手段が算出した外力又はモーメントを加味して、前記運動方程式の解を算出することができる。

【発明の効果】

【0040】

本発明によれば、歩行パターン生成を実機上で実時間により好適に行なうことができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することができる。

【0041】

また、本発明によれば、歩行パターン生成と各種適応制御のための力学モデルの一貫性を保証して良好な歩行制御を行なうことができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することができる。

【0042】

また、本発明によれば、計算リソースの限られた組込み CPU 上で機体の安定化制御を好適に行なうことができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することができる。

【0043】

また、本発明によれば、各適応制御機能間で相互干渉性を考慮した一貫性のある力学モデルを共有して歩行性能を向上することができる、優れたロボット装置及びロボット装置の制御方法を提供することができる。

【0044】

また、本発明によれば、センサなどから非同期に入力される歩幅・歩行周期・旋回角・足上げ高さなどの歩容パラメータを満足するよう、機体の力学的バランス平衡を保ったまま即応的に全身運動を再計画する「実時間歩行パターン生成」の機能により、任意のタイミングで連続的歩容変化を実行することが可能であり、柔軟で且つ多様な歩行性能を実現することができる。

【0045】

また、本発明によれば、実時間歩行パターン生成機能により、任意のタイミングで特定部位（例えば上肢）の運動を組み合わせ実行できるように全身運動が再計画される。したがって、安定化制御系に大きな負担をかけることなく、非同期且つリアクティブに特定部位を駆動することが可能となるとともに、動作パターンの多様化を実現することができる。

【0046】

また、本発明によれば、安定化アルゴリズムのための演算が一回の実時間歩行パターン

10

20

30

40

50

生成アルゴリズム内の演算に集約・統合されている。したがって、高い計算効率で実時間歩行パターン生成機能と安定化機能の両立を実現することができ、計算リソースの限られた組み込みCPU上での実行に有利で、CPUリソースの節約を図ることができる。

【0047】

また、本発明によれば、安定化機能の中で用いる力学演算が実時間歩行パターン生成演算に集約され、基本的に実時間歩行パターン生成部の設定項目への追加入力を行なうのみで安定化機能が追加されることから、演算の節約とともに拡張性に優れた歩行系を構成することができる。

【0048】

また、本発明によれば、安定化機能の中で用いる力学演算が各種安定化の干渉効果が考慮された一回の実時間歩行パターン生成演算に集約されることから、独立な力学モデル間の不用意な干渉がなく、力学モデルの一貫性が図られ、良好な歩行制御機能を実現することができる。

【0049】

本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施形態や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

【発明を実施するための最良の形態】

【0050】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳解する。

【0051】

図1には、本発明の実施に供される脚式移動ロボットの自由度構成を模式的に示している。

【0052】

同図に示すロボットは、2脚2腕を有する人間型ロボットである。本ロボットは、機体に四肢が取り付けられ、肩関節ピッチ軸、肩関節ロール軸、上腕ヨー軸、肘関節ピッチ軸、前腕ヨー軸、手首ロール軸、手首ピッチ軸という7自由度からなる左右の腕部と、股関節ヨー軸、股関節ロール軸、股関節ピッチ軸、膝ピッチ軸、足首ピッチ軸、足首ロール軸という6自由度からなる左右の脚部で構成されている。

【0053】

これらの各関節自由度は、実際にはアクチュエータ・モータにより実現される。本実施形態では、ギア直結型で且つサーボ制御系をワンチップ化してモータ・ユニットに内蔵したタイプの小型ACサーボ・アクチュエータを搭載する。なお、この種のACサーボ・アクチュエータに関しては、例えば本出願人に既に譲渡されている特開2000-299970号公報（特願平11-33386号明細書）に開示されている。

【0054】

機体には、加速度センサA1及びジャイロG1が搭載されている。また、左右の足底四隅には、足底面垂直方向の床反力を検出する1軸ロードセル（F1～F8）と、床面までの距離を測定する赤外線測距センサ（D1～D8）がそれぞれ4つ取り付けられている。また、左右の足底中央部には、それぞれ加速度センサ（A2，A3）及びジャイロ（G2，G3）が取り付けられている。

【0055】

図2には、本実施形態に係る脚式移動ロボットに適用される歩行制御システムの機能構成を模式的に示している。

【0056】

図示の通り、この歩行制御システムは、ロボット状態観測部21と、環境形状観測部22と、外力・外モーメント観測部23と、実時間歩行パターン生成部25と、上肢・下肢要求運動入力部24と、全身関節駆動部26により構成される。

【0057】

ロボット状態観測部21は、機体の各部に装備された種々のセンサ（前述）からの情報を基に、実際のロボットの運動状態量を計測し、その結果を実時間歩行パターン生成部2

5へと出力する。

【0058】

環境形状観測部22は、種々のセンサ（前述）からの情報を基に、路面傾斜・段差高さなどの環境形状を算出し、その結果を実時間歩行パターン生成部25へと出力する。

【0059】

外力・外モーメント観測部23は、主にロボット上に搭載された力センサ並びに加速度センサ情報を基に、ロボットに対して外界から作用する外力・外モーメントを算出し、その結果を実時間歩行パターン生成部25へ反映する。

【0060】

上肢・下肢要求運動入力部24は、ユーザ・プログラムに従って時々刻々と決定される上肢への運動要求と、歩幅・歩行周期・旋回角などの下肢への要求運動に関する歩容パラメータを入力し、実時間歩行パターン生成部25へと出力する。

【0061】

実時間歩行パターン生成部25は、外力・外モーメント観測部23において検出された外力下にて力学的なバランス平衡を維持しつつ、現在のロボットの運動状態から滑らかに遷移可能で、環境形状に係る運動学的拘束とユーザ・プログラムからの上肢・下肢運動変更要求を共に満足することができる次時刻のロボットの運動状態を決定し、全身の関節角参照値を出力する。

【0062】

全身関節駆動部26は、実時間歩行パターン生成部25の出力した関節角参照値を実現するよう、各関節の自由度を構成するアクチュエータ・モータ（前述）をサーボ・コントローラ（図示しない）により駆動する。

【0063】

図3には、図2に示した歩行制御システムの処理の流れをフローチャートの形式で示している。この歩行制御システムは、例えば10ミリ秒という制御周期で動作するものとする。

【0064】

この制御系は、処理開始後にステップS1に移行し、上肢・下肢要求運動入力部24において、上肢・下肢への運動要求を受理する。上肢への要求は例えば関節角参照値として、下肢への要求は歩幅・歩行周期・旋回角などの歩容パラメータとして与えられる。

【0065】

続いて、ロボット状態観測部21において、種々のセンサ情報を基に実際のロボットの運動状態を表す状態ベクトルを算出する（ステップS2）。

【0066】

次いで、環境形状観測部22において、種々のセンサ情報を基に路面段差・路面傾斜などの環境形状を算出する（ステップS3）。

【0067】

次いで、外力・外モーメント観測部23において、力センサなどの値に基づきロボット各部へ印加されている外力・外モーメント値を計測する（ステップS4）。

【0068】

次いで、実時間歩行パターン生成部25において、ロボットの現在状態、環境形状、印加外力、ユーザからの運動変化要求を反映しつつ、力学的なバランス平衡を維持するようなロボットの全身運動を再計画する（ステップS5）。

【0069】

最後に、全身関節駆動部26において、各関節自由度を構成するアクチュエータ・モータをサーボ・コントローラにより駆動する（ステップS6）。

【0070】

以上の処理が一般に本システムの1周期に関する処理であり、終了後、再度ステップS1の実行に戻る処理を制御周期 $\Delta t$ 毎に実行する。

【0071】

本実施形態に係る歩行制御システムは、ユーザ・プログラムからの運動変更要求を、力学的バランス平衡を維持したまま即応的に満足する実時間全身運動再計画の機能を備え、且つ、当該機能に対し、現在のロボットの实状態、実環境形状、外力など実世界情報を反映することを特徴とする。

#### 【0072】

すなわち、本システムによれば、未知環境適応に関する安定化のための演算を別途行うことなく、ロボットの实状態、実環境形状、外力を実時間全身運動再計画演算の境界値や拘束条件として入力することで、一回の実時間全身運動再計画演算内で歩行パターン生成演算と安定化演算の演算共有化を実現することができる。

#### 【0073】

これにより、ロボットの歩行安定化制御のための演算の節約がなされるので、計算リソースの限られた組込みCPU上でも、柔軟な運動要求反映機能とロバスト性を兼ね備えた高機能全身運動制御系を構築することが可能となる。

#### 【0074】

一般に、歩行パターン生成や種々の安定化で用いられる力学モデルが相異なると、力学モデル間の不用意な干渉を生じて歩行性能の低下につながる可能性が否定できない。これに対し、本実施形態に係る歩行制御システムでは、力学演算は単一の歩行パターン生成演算内で一貫して行なわれるため、このような種々のアルゴリズム間の不用意な干渉が生じ難く、良好な歩行性能を得ることができる。

#### 【0075】

以下では、その基本演算を実行する実時間歩行パターン（歩容）生成部25の構成例について説明する。

#### 【0076】

図4には、実時間歩行パターン生成部25の内部構成を模式的に示している。同図に示すように、実時間歩行パターン生成部25は、足底位置・姿勢軌道生成部41と、ZMP方程式求解部42と、質点分布調整部43と、関節角算出部44と、現在状態決定部45より構成される。また、実時間歩行パターン生成部25は、上肢・下肢要求運動入力部24からの上肢参照軌道及び歩容パラメータ、環境形状観測部22からの環境形状、外力・外モーメント観測部23からの外力・外モーメント、ロボット状態観測部21からの現在実状態を入力に持つ。

#### 【0077】

足底位置・姿勢軌道生成部41には、歩幅・歩行周期・旋回角・足上げ高さなどの下肢要求運動に関する歩容パラメータと、環境形状観測部22より得られた路面高さや路面傾斜などの環境形状が入力される。足底位置・姿勢軌道生成部41は、これらの入力された値を用いて、一歩前の着床状態から数歩先までの左右両足底の位置及び姿勢軌道を算出する。

#### 【0078】

図5には、足底の位置・姿勢軌道を示している。同図に示すように、位置に関しては座標位置( $x, y, z$ )で、姿勢に関してはEuler(オイラー)角( $\alpha, \beta, \gamma$ )などを用いて表現する。また、各軌道は歩容パラメータや環境形状に適合するよう、左右足底について各パラメータ毎に多項式補間などを用いて時系列を生成することで構成する。例えば、左足底位置姿勢軌道に関しては、左足底位置姿勢を( $x_L, y_L, z_L, \alpha_L, \beta_L, \gamma_L$ )、一歩前の左足底位置姿勢を( $x_{L1}, y_{L1}, z_{L1}, \alpha_{L1}, \beta_{L1}, \gamma_{L1}$ )とすると、次の着床位置姿勢( $x_{L2}, y_{L2}, z_{L2}, \alpha_{L2}, \beta_{L2}, \gamma_{L2}$ )は歩幅・歩行周期・旋回角などの歩容パラメータにより決定され、その間の左足底位置姿勢軌道は以下に示すように各位置姿勢毎の補間式によって構成される。

#### 【0079】

【数 1】

$$x_L = x_L(t; x_{L1}, x_{L2})$$

$$y_L = y_L(t; y_{L1}, y_{L2})$$

$$z_L = z_L(t; z_{L1}, z_{L2})$$

$$\alpha_L = \alpha_L(t; \alpha_{L1}, \alpha_{L2})$$

$$\beta_L = \beta_L(t; \beta_{L1}, \beta_{L2})$$

$$\gamma_L = \gamma_L(t; \gamma_{L1}, \gamma_{L2})$$

10

【0080】

補間式には、例えば5次の多項式などを用いることができる。2歩目以降の足底位置姿勢は、1歩目と同一の歩容並びに環境状況が継続するものとして、同様に補間式によって構成される。

20

【0081】

ZMP方程式求解部42では、足底位置・姿勢軌道生成部41で生成された足底位置姿勢軌道、歩容パラメータ、ロボットの現在の状態、外力印加状態に基づいて、力学的バランス平衡を維持しつつ、これらの条件を満足するための時刻 $\Delta t$ 後のロボットの状態ベクトルを算出する。以下では、ZMP方程式求解部42の簡単な構成例として重心位置・速度を状態ベクトルとする場合について説明する。

【0082】

ロボットの質量を $m$ 、慣性座標系内での重心位置を $x = (x, y, z)^T$ 、ロボットが外界から受ける力及びモーメントをそれぞれ $f = (f_x, f_y, f_z)^T$ 及び $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ とする。また、慣性座標系内に任意の点 $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ を考え、 $p$  30  
回りに発生するモーメントを $M$ とする。また、重力加速度ベクトルを $-g = (0, 0, -g)^T$ とする。

【0083】

点 $p$ 回りのモーメントの平衡条件より、

【0084】

【数2】

$$M = n + (x - p) \times f \quad (\text{式1})$$

40

【0085】

また、重心の運動方程式より、

【0086】

【数 3】

$$m\ddot{x} = f - mg \quad (\text{式 2})$$

【0 0 8 7】

ここで、上記の（式 1）及び（式 2）を用いてロボットが外界から受ける力  $f$  を消去す 10  
ると、

【0 0 8 8】

【数 4】

$$M = (x - p) \times m(\ddot{x} + g) + n \quad (\text{式 3})$$

【0 0 8 9】

点  $p$  を ZMP にとると、水平軸モーメントがゼロとなるので、

【0 0 9 0】

【数 5】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ * \end{bmatrix} = (x - p) \times m(\ddot{x} + g) + n \quad (\text{式 4})$$

【0 0 9 1】

上記の（式 4）において、第 1 及び第 2 要素について展開すると、下式に示すようにロ 30  
ボットの重心運動に関する ZMP 方程式を得ることができる。

【0 0 9 2】

【数 6】

$$\begin{aligned} (z - p_z)\ddot{x} - (x - p_x)(\ddot{z} + g) &= -n_y \\ (z - p_z)\ddot{y} - (y - p_y)(\ddot{z} + g) &= n_x \end{aligned} \quad (\text{式 5})$$

【0 0 9 3】

このように、外モーメント  $n$  は ZMP 方程式中にて強制項として現れる。点  $p$  がロボッ 50  
トの接地多角形内に存在するとの拘束条件下で上記の（式 5）を満足する全身運動を得る

ことが物理的に実行可能な歩行パターンを生成することに相当する。

【0094】

(式5)は、単純な形式で表現されているものの、 $x$ 及び $y$ に関して変係数の微分方程式であり、解析解を得ることは容易ではない。本実施形態では、一旦、比較的短時間の時間区間 $T$ を考え、この区間内において以下の近似が成立すると仮定する。

【0095】

(仮定1) ZMP軌道は加速度を有さない。

(仮定2) 重心高さは一定である。

(仮定3) 外モーメントは一定である。

【0096】

すると、(式5)は以下のような簡素な常微分方程式となる。

【0097】

【数7】

$$m(Z\ddot{X} - gX) = -n_y = \text{const} \quad (\text{式6})$$

10

20

【0098】

但し、

【0099】

【数8】

$$X = x - p_x \quad (\text{式7})$$

$$Z = z - p_z = \text{const} \quad (\text{式8})$$

30

【0100】

であり、 $x$ 成分のみ記した。(式6)の一般解は以下の通りである。

【0101】

【数9】

$$x = p_x + C_1 \exp(\lambda t) + C_2 \exp(-\lambda t) + \frac{n_y}{mg} \quad (\text{式9})$$

$$\dot{x} = \dot{p}_x + \lambda \{C_1 \exp(\lambda t) - C_2 \exp(-\lambda t)\}$$

40

【0102】

但し、 $\lambda$ は固有値であり、以下の式で表される。

【0103】

50

【数 1 0】

$$\lambda = \sqrt{g/Z} \quad (\text{式 1 0})$$

【0 1 0 4】

ここで、(式 9) の境界値を計算すると、以下の通りとなる。

10

【0 1 0 5】

【数 1 1】

$$x(0) = p_x(0) + C_1 + C_2 + \frac{n_y}{mg}$$

$$\dot{x}(0) = \dot{p}_x(0) + \lambda(C_1 - C_2)$$

$$x(T) = p_x(T) + C_1 \exp(\lambda T) + C_2 \exp(-\lambda T) + \frac{n_y}{mg} \quad (\text{式 1 1})$$

20

$$\dot{x}(T) = \dot{p}_x(T) + \lambda\{C_1 \exp(\lambda T) - C_2 \exp(-\lambda T)\}$$

【0 1 0 6】

30

ZMP 方程式は非線型方程式であり、これを解くには計算負荷が高く、演算時間が長くなってしまふ。本実施形態に係る歩行制御システムは、ロボットの実機上でリアルタイムで歩行制御を行なうことを目的とするので、所定の区間毎に分割して線形近似を行なうことによって、処理のリアルタイム性を確保するようにしている。

【0 1 0 7】

一般の歩行では、上述したような(仮定 1) ~ (仮定 3) を満足するような複数の短期区間が連なって構成されているとしてモデル化することができる。図 6 には、仮定条件(仮定 1) ~ (仮定 3) を満足する短期区間が N 区間連なって構成されているとしてモデル化された歩行モデルを示している。以下の説明では、扱いが容易な短期区間の取り方として、片脚支持期と両脚支持期の境界で区間を区切る例を扱うものとする。i 番目の区間 i の時間幅を  $T_i$ 、未定係数を  $C_{1i}$ 、 $C_{2i}$ 、固有値を  $\lambda_i$ 、区間 i の終端における ZMP 位置を  $p_{xi}$ 、重心位置を  $x_i$  とすると、上記の(式 1 1) の境界条件は、一般の区間においては以下のように表される。

40

【0 1 0 8】



【数 1 2】

$$x_{i-1} = p_{xi-1} + C_{1i} + C_{2i} + \frac{n_y}{mg}$$

$$\dot{x}_{i-1} = \dot{p}_{xi-1} + \lambda_i (C_{1i} - C_{2i})$$

$$x_i = p_{xi} + C_{1i} \exp(\lambda_i T_i) + C_{2i} \exp(-\lambda_i T_i) + \frac{n_y}{mg} \quad (\text{式 1 2})$$

10

$$\dot{x}_i = \dot{p}_{xi} + \lambda_i \{C_{1i} \exp(\lambda_i T_i) - C_{2i} \exp(-\lambda_i T_i)\}$$

【0 1 0 9】

但し、外モーメント  $n_y$  は全区間で一定とした。隣接する区間と区間の間の重心位置・速度の連続条件より、以下の式が各短期区間境界 ( $i = 2 \cdots N$ ) において成立する。

【0 1 1 0】

20

【数 1 3】

$$C_{1i} + C_{2i} = C_{1i-1} \exp(\lambda_{i-1} T_{i-1}) + C_{2i-1} \exp(-\lambda_{i-1} T_{i-1}) \quad (\text{式 1 3})$$

$$\frac{p_{xi} - p_{xi-1}}{T_i} + \lambda_i (C_{1i} - C_{2i})$$

$$= \frac{p_{xi-1} - p_{xi-2}}{T_{i-1}} + \lambda_{i-1} \{C_{1i-1} \exp(\lambda_{i-1} T_{i-1}) - C_{2i-1} \exp(-\lambda_{i-1} T_{i-1})\}$$

30

(式 1 4)

【0 1 1 1】

また、区間 1 の始端条件を歩行期間全体の始端条件として、その重心位置及び速度を実現するように、以下に示すように設定する。

【0 1 1 2】

40

【数 1 4】

$$C_{1_1} + C_{2_1} + p_{x0} + \frac{n_y}{mg} = \bar{x}_0 \quad (\text{式 1 5})$$

$$\frac{p_{x1} - p_{x0}}{T_1} + \lambda_1(C_{1_1} - C_{2_1}) = \dot{\bar{x}}_0 \quad (\text{式 1 6})$$

10

【0 1 1 3】

同様にして、区間 N の終端条件を歩行期間全体の終端条件として、その重心位置及び速度を実現するように、以下に示すように設定する。

【0 1 1 4】

20

【数 1 5】

$$p_{x_N} + C_{1_N} \exp(\lambda_{1N} T_N) + C_{2_N} \exp(-\lambda_{2N} T_N) + \frac{n_y}{mg} = \bar{x}_N \quad (\text{式 1 7})$$

$$\frac{p_{x_N} - p_{x_{N-1}}}{T_N} + \lambda_N \{C_{1_N} \exp(\lambda_{1N} T_N) - C_{2_N} \exp(-\lambda_{2N} T_N)\} = \dot{\bar{x}}_N \quad (\text{式 1 8})$$

30

【0 1 1 5】

始端条件の重心位置及び速度には、現在状態決定部 4 5 から出力される現在の状態ベクトル（本実施形態では重心位置と速度）を代入する。これにより、ZMP 方程式の解に対し、現在の状態に位置及び速度が連続となるような拘束が課せられる。

【0 1 1 6】

終端条件の重心位置には、足底位置・姿勢軌道生成部 4 1 より取得した歩行期間終端における両足底位置を基に、両足底の中心位置などを設定する。また、終端条件の速度には、重心位置にて重心が静止するとの条件を仮定し、ゼロを代入するなどの設定を行なう。これにより、ZMP 方程式の解に対し、2 ～ 3 歩先の歩行周期終端にて重心が両足底中心の直上に到達するような拘束が課せられる。

40

【0 1 1 7】

実時間歩行パターン生成においては、制御サイクル毎に歩行パターンを再生成し、次制御サイクルにおける運動状態を決定するので、現時刻から十分離れた終端時刻における終端到達条件がこのように近似的に与えられても、実用上十分な精度の解を得ることができる。

【0 1 1 8】

上記の（式 1 3）～（式 1 8）は、2 N + 2 個の拘束条件を与える。変数に関しては未

50

定係数  $C_{1i}$ 、 $C_{2i}$  ( $i = 1 \dots N$ ) 以外の変数の設定の仕方として多くの方法が考えられる。本実施形態では、 $p_{xi}$  ( $i = 1 \dots N$ ) を変数に加える。

【0119】

このとき、変数の数は  $3N$  個となり、変数の数が過剰となるため、最適化問題として取り扱う。例えば、短期区間境界における安定領域中心（即ち接地多角形重心）と ZMP 位置

【0120】

【数16】

$$P_{xi} (i = 1 \dots N)$$

10

【0121】

の差分を最小化するよう、以下の（式19）に示すような等式制約条件付きの2次計画問題として扱うことで、これらの変数を一意に定めることができる。接地多角形重心位置

【0122】

【数17】

$$\bar{P}_{xi} (i = 1 \dots N)$$

20

【0123】

は、足底位置・姿勢軌道生成部41で生成された足底位置軌道を基に得ることができる。

【0124】

【数18】

30

$$\min \sum (p_{xi} - \bar{p}_{xi})^2 \quad (\text{式19})$$

【0125】

あるいは、特定区間  $j$ 、 $k \in [1, N]$  以外の ZMP 位置は接地多角形重心位置に固定とし、 $p_{xj}$ 、 $p_{xk}$  のみを変数に設定して、（式13）～（式18）を  $2N + 2$  元連立1次方程式として解くようにしてもよい。

【0126】

以上により、（式9）を用いて、外モーメントが作用する条件下にて現在の運動状態に滑らかに接続し、所望の時刻に指定運動状態に到達するための中間運動状態を算出することができる。同式を用いることにより、以下のように、次の制御サイクル（時刻  $\Delta t$  後）で用いるべきロボットの状態を算出することができる。

【0127】

40

【数 1 9】

$$\begin{aligned}
 x(\Delta t) &= p_{x0} + C_{1_0} \exp(\lambda_0 \Delta t) + C_{2_0} \exp(-\lambda_0 \Delta t) + \frac{n_y}{mg} \\
 \dot{x}(\Delta t) &= \dot{p}_{x0} + \lambda_0 \{C_{1_0} \exp(\lambda_0 \Delta t) - C_{2_0} \exp(-\lambda_0 \Delta t)\}
 \end{aligned}
 \quad (\text{式 2 0})$$

10

【0 1 2 8】

質点分布調整部 4 3 では、上記の ZMP 方程式求解部 4 2 で得られた次時刻状態ベクトルを実現し、且つ、ユーザ・プログラムより指定された上肢参照軌道（例えば関節角軌道）と足底軌道（歩容パラメータにより与えられる）を満足するように、全身の質点分布状態を調整する。

20

【0 1 2 9】

ここでは、基本的な例として、足底位置姿勢・上体関節角をユーザ・プログラムの要求値に固定したまま、機体の位置（ $x_B$ ,  $y_B$ ,  $z_B$ ）を操作し、ZMP 方程式求解部 4 2 で得られた重心位置となるように全身質点分布を調整する。このような幾何的拘束条件下において、機体の速度と重心の速度の間には、ヤコビアンを  $J_B$  とすると、以下の関係が成立する。

【0 1 3 0】

【数 2 0】

30

$$\dot{x} = J_B \dot{x}_B \quad (\text{式 2 1})$$

【0 1 3 1】

但し、ヤコビアン  $J_B$  は現在の脚関節角に依存する。現在のロボットの重心位置  $x_k$  と ZMP 方程式求解部 4 2 で得られた次時刻の重心位置  $x_{k+1}$  の間に  $dx = x_{k+1} - x_k$  の偏差が存在するとき、基体位置の操作量  $dx_B$  は近似的に以下の式で得ることができる。

【0 1 3 2】

【数 2 1】

40

$$dx_B = J_B^{-1} dx \quad (\text{式 2 2})$$

【0 1 3 3】

ここで、重心の算出には、ユーザ・プログラムより入力される上肢関節角参照値も反映される。以上より、現在の基体位置を  $x_{Bk}$  とすると、ZMP 方程式求解部 4 2 で得られた状態を実現するため質点分布調整後の機体位置  $x_{Bk+1}$  は以下の式で得ることができる。

50

【0134】  
【数22】

$$\mathbf{x}_{B_{k+1}} = \mathbf{x}_{B_k} + \mathbf{J}_B^{-1} d\mathbf{x} \quad (\text{式23})$$

【0135】

但し、(式23)の結果得られる重心位置とZMP方程式求解部42で得られた次時刻の重心位置の偏差がなお大きな場合には、(式23)を繰り返し用いて、偏差が十分小さくなるまで収束演算を実行してもよい。

【0136】

、関節角算出部44では、質点分布調整部43で得られた次時刻の基体位置、及び足底位置・姿勢軌道生成部41より得られる次時刻の足底位置姿勢を実現するように脚部の関節角を決定する。これは、両者の相対位置姿勢を求めた後、例えば、周知の逆キネマティクス計算によって実行することができる。

【0137】

逆キネマティクス計算で得られた脚関節角とユーザ・プログラムより与えられた上肢の参照関節角とを併せて、次時刻における全身関節角参照値として出力する。この全身関節角参照値は全身関節駆動部26の関節角参照値として用いられる。

【0138】

現在状態決定部45は、各種センサ値を基に算出されたロボットの現在状態ベクトルと、前回の制御サイクルでZMP方程式求解部42において算出され参照値として用いられた状態ベクトルより、次回の制御サイクルでZMP方程式求解部の始端条件として用いるべき現在状態ベクトルを決定・更新する。すなわち、各種センサ値を基に算出されたロボットの現在状態ベクトルと、ZMP方程式求解部42において算出された状態ベクトルは一般に異なるため、その調整演算を行なう。

【0139】

ロボットの実状態を反映する必要のない場合には、ZMP方程式求解部42の出力を現在状態ベクトルとして出力するのみでよい。これは、実時間歩容生成の結果出力される歩行パターンを開ループ制御下にて実行する場合に相当する。一方、ロボットの実状態を反映する必要のある場合には、各種センサ値を基に算出されたロボットの現在状態ベクトルを現在状態ベクトルとして出力する。各種センサ値を基に算出されたロボットの現在状態ベクトルが理想値からの差分で与えられる場合には、ZMP方程式求解部42の出力に差分ロボットの現在状態ベクトルを加算し、現在状態ベクトルとして出力するように構成してもよい。

【0140】

以上、実時間歩行パターン生成部25の内部構成について説明してきた。図7には、実時間歩行パターン生成部25における処理の流れをフローチャートの形式で示している。

【0141】

まず、前制御サイクルにてZMP方程式求解部42で算出された状態ベクトルと、各種センサ値を基に算出されたロボットの現在状態ベクトルより、今回の制御サイクルにおいてZMP方程式初期条件として設定すべき現在状態ベクトルを算出する(ステップS11)。

【0142】

次いで、現在の両足位置姿勢と、歩幅・歩行周期・旋回角などのユーザ・プログラムからの要求歩容パラメータに応じて、数歩先までの足底位置姿勢軌道を生成する(ステップS12)。

10

20

30

40

50

## 【0143】

次いで、ステップS11にて得られた現在状態ベクトルをZMP方程式始端拘束条件として設定する(ステップS13)。同様に、ステップS12にて得られた数歩先の足底位置姿勢に基づいて、ZMP方程式の終端拘束条件を設定する(ステップS14)。

## 【0144】

また、外力・外モーメント観測部23の結果をZMP方程式の強制外力項に設定する(ステップS15)。そして、ステップS16では、これらの条件を満足するよう、ZMP方程式の境界値問題を解く。

## 【0145】

本実施形態では、センサ値を含めた実際のロボットの現在状態ベクトルを初期条件として設定したり、実測外力値を強制項に反映したりするなど、実世界の状態をZMP方程式求解に反映することが可能である。こうして得られたZMP方程式の解より、次制御サイクル(時刻 $\Delta t$ 後)におけるロボットの状態ベクトル(目標状態ベクトル)を算出する(ステップS17)。この状態ベクトルは、現在の運動状態に滑らかに接続し、ユーザからの要求歩容パラメータを反映しつつ、外力作用条件下にて力学的バランス平衡を維持する値を与えている。

## 【0146】

次いで、この状態ベクトル(目標状態ベクトル)を実現するための全身質点分布を求め(ステップS18)、その結果を関節角参照値に変換して(ステップS19)、1制御周期内の実時間歩行パターン生成演算を終了する。

## 【0147】

本処理ルーチンが制御周期毎に実行されることで、急激な歩容変化や実運動状態変化に対して即応的な対応が可能となる。

## 【0148】

本実施形態に係るロボットの歩行制御方式は、実時間歩行パターン生成部25に実環境の状況を反映するようになっている。これによって、未知環境条件に対する適応歩行性能を実現するために、特に適応制御系のために新たな力学モデルを付加する必要がない。すなわち、ひとたび汎用実時間歩行パターン生成部25が構成されれば、適応制御機能の追加手続きは、ロボット状態観測部21、環境形状観測部22、及び外力・外モーメント観測部23を構成するのみとなる。

## 【0149】

以下では、ロボット状態観測部21、環境形状観測部22、及び外力・外モーメント観測部23を構成するための幾つかの構成例について説明する。

## 【0150】

適応制御機能を追加する第1の例は、ロボット状態観測部21に関する構成例である。ロボット状態観測部21は、実時間歩行パターン生成部25内の状態ベクトルに相当する物理量を種々のセンサ値を基に計測する。本実施形態では、上述した実時間歩行パターン生成部25内の状態ベクトルに相当する、重心位置・重心速度を計測するように構成すればよい。

## 【0151】

図8には、ロボットの機体全体の回転運動によって重心位置偏差が発生している様子を示している。重心位置偏差 $\Delta x$ が、図示の通り、主にZMP中心位置回りのロボット全体の回転運動によって発生すると考えると、以下の式で近似的に求めることができる。

## 【0152】

10

20

30

40

【数 2 3】

$$\Delta x = \Delta R(x - p) \quad (\text{式 2 4})$$

【0 1 5 3】

ここで、 $\Delta R$ は機体に取り付けられた加速度センサ及びジャイロにより得られる傾斜偏差を表す行列である。また、重心速度偏差は以下の式を用いて近似的に求めることができる。

【0 1 5 4】

【数 2 4】

$$\Delta \dot{x} = \Delta \omega \times (x - p) \quad (\text{式 2 5})$$

20

【0 1 5 5】

ここで、 $\Delta \omega$ は機体に取り付けられたジャイロより得られる角速度偏差ベクトルである。重心位置偏差及び重心速度偏差を現在状態決定部 4 5 に入力することで、次の実時間歩容生成演算の始端条件として反映され、重心軌道偏差を考慮した歩行パターンの再計画が行なわれる。

【0 1 5 6】

図 9 には、重心位置・重心速度を計測するように構成されたロボット状態観測部 2 1 における重心位置及び速度偏差算出処理を行なう処理手順をフローチャートの形式で示している。

30

【0 1 5 7】

まず、機体に取り付けられた加速度計 A 1 あるいはジャイロ G 1 の値を用いて基体の実傾斜  $R$  を測定し、実時間歩行パターン生成部 2 5 で算出された機体の計画上の傾斜値  $R_0$  からの偏差として、傾斜偏差を  $\Delta R = R - R_0$  などとして算出する (ステップ S 2 1)。

【0 1 5 8】

同様に、機体に取り付けられたジャイロの値を用いた機体の実角速度  $\omega$  を計測し、実時間歩行パターン生成部 2 5 で算出された機体の計画上の角速度  $\omega_0$  からの偏差として、 $\Delta \omega = \omega - \omega_0$  を算出する (ステップ S 2 2)。

【0 1 5 9】

続いて、上記の (式 2 4) に基づく重心位置偏差の算出 (ステップ S 2 3)、(式 2 5) に基づく重心速度偏差の算出を行なって (ステップ S 2 4)、本処理を終了する。この結果として得られた重心位置偏差及び重心速度偏差を現在状態決定部 4 5 に入力する。

【0 1 6 0】

ロボット状態観測部 2 1 をこのように構成することで、ロボットがバランスを喪失し、重心軌道が計画状態から歪んだとしても、その状態を回復するための演算が実時間歩行パターン生成演算の一環として行なわれる。したがって、柔軟な歩容変更要求への対応機能と未知環境に対する適応機能をより少ない演算で実現することが可能となる。

【0 1 6 1】

本実施形態では、状態ベクトルを計測するための手段として機体に取り付けられた加速度・ジャイロを用いる簡単な例を示したが、本発明の要旨はこれに限定されるものではない。

50

い。例えば、足底力センサ・加速度センサ（例えば図1のA2, A3）・ジャイロ（例えば図1のG2, G3）や、全身に分布配置された加速度センサ・ジャイロ・力センサなどを協調的に用いて計測するように構成してもよい。

#### 【0162】

次いで、適応制御機能を追加する第2の例として、ロボット状態観測部21に加え、さらに環境形状測定部22を構成する例について説明する。

#### 【0163】

環境形状観測部22は、種々のセンサ値に基づき、路面段差・路面傾斜などの環境形状を算出し、実時間歩行パターン生成部25に入力するように構成する。特に本実施形態では、足底力センサ値を用いて路面形状を把握する例について以下に説明する。

10

#### 【0164】

図10には、路面傾斜の算出方法を図解している。本実施形態に係るロボットの左右の足底四隅には前述の通り足底面垂直方向の1軸力を計測する力センサが取り付けられているが、その出力をそれぞれ図10の左側に示すように $F_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) とする。

#### 【0165】

足底が路面と接触していない遊脚期には、その出力は荷重値0を示し、路面形状に関する情報は得られない。このような場合、路面のロール傾斜角推定値 $\alpha_F$ 、ピッチ傾斜角推定値 $\beta_F$ はともに緩やかに0に復元させる処理を行なう。また、着床とともに $F_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) は正の値を出力するので、この値を用いて路面傾斜角の推定処理を実行する。

20

#### 【0166】

このような路面傾斜算出結果を実時間歩行パターン生成部25に入力すると、足底の軌道に反映され、その角度に足底が倣うように足底が駆動される。よって、推定値を制御サイクル毎に更新することで、図10右に示すように足底は路面に対して倣うように駆動される。

#### 【0167】

足底が路面に倣うと、図10右下に示すように、四辺形足底のいずれの辺の力センサ値の和も非0荷重を出力する。例えば、ロール方向に関しては、 $F_L = F_1 + F_2$ の値と $F_R = F_3 + F_4$ の値がともに非0荷重を出力すれば路面に倣ったとみなしてよい。ピッチ方向に関しても同様に、 $F_F = F_1 + F_4$ の値と $F_B = F_2 + F_3$ の値がともに非0荷重を出力すれば路面に倣ったとみなしてよい。

30

#### 【0168】

足底をこのように駆動するには、以下の式に示すように、足底の前後辺及び左右辺の荷重差に一定のゲインを掛けた値分だけ路面傾斜推定値を増加又は減少させればよい。

#### 【0169】

#### 【数25】

$$\begin{aligned}\alpha_F &= \alpha_F + K_{roll} \times (F_L - F_R) \\ \beta_F &= \beta_F + K_{pitch} \times (F_B - F_F)\end{aligned}\quad (式26)$$

40

#### 【0170】

本実施形態では、路面傾斜推定演算は、ロール方向に関しては $F_L$ 、 $F_R$ のいずれかが、ピッチ方向に関しては $F_F$ 、 $F_B$ のいずれかが、小さな値を示している場合について実行する。つまり、倣いが達成されるまでは路面傾斜推定値が随時更新され、足底は路面に倣うように駆動される。一方、倣いが達成された状態では路面傾斜推定値は不用意に更新しな

50



い。以上により、足底力センサによって適切に路面の傾斜を計測することができる。

【0171】

同様に、路面高さの計測も足底力センサを用いて行うことができる。以下、路面高さ推定値を  $z_F$  とし、検出対象の足底に設置された各センサで検出された総垂直反力を  $F$  とする。

【0172】

計画上、遊脚期であるにも関わらず垂直反力が検出された場合は、現在の推定値以上の高さとなる路面に接触したと考えることができるため、以下のように徐々に路面高さ推定値を増大させ、足底軌道を上方修正する。

【0173】

【数26】

$$z_F = z_F + K_Z F, \quad F = \sum_{i=1}^{i=4} F_i \quad (\text{式27})$$

【0174】

また、計画上、支持脚期であるにも関わらず垂直反力が検出されない場合は、現在の推定値以下の高さとなる路面であると判断することができる。そこで、以下のように徐々に路面高さ推定値を減少させ、足底軌道を下方修正する。

【0175】

【数27】

$$z_F = z_F - K_Z \delta z \quad (\text{式28})$$

【0176】

ここで、 $\delta z$  は微小な変更量とする。足底が路面と接触していない遊脚期には、足底を計画軌道に復帰させるため、路面高さ推定値  $z_F$  を緩やかに 0 に復元させる処理を行なう。

【0177】

以上の処理により、図11に示すように、足底軌道は、着床とともに未知路面高さに対して拘束を受けた後、遊脚期にて計画軌道へ徐々に復帰するように実行される。

【0178】

上述したように、路面傾斜角推定値  $\alpha_F$ 、 $\beta_F$ 、及び路面高さ推定値  $z_F$  を左右の足底それぞれに対して計測し、制御周期毎に前記実時間歩容生成部の足底軌道生成部の離床・着床時の足底位置・姿勢に反映することで、ロボットは力学的バランス平衡を保ちつつ、未知路面形状に適合するように足底軌道を再計画しながら安定歩行を維持・継続することができる。特に、ロボット状態観測部21と併用することでよりロバストな歩行性能を実現することができる。

【0179】

図12には、路面傾斜・路面高さ推定処理の手順をフローチャートの形式で示している。但し、簡単のため、片足に関する処理のみ記載する。路面傾斜に関してはロール方向に係る処理のみを記載する。

## 【0180】

まず、本処理は所定の制御周期毎に実行され路面傾斜推定値及び路面高さ推定値は更新されるが、初回においては、ステップS31及びS32において計画値に初期化する。

## 【0181】

続いて、総床反力 $F$ 、足底4辺に作用する反力 $F_L$ 、 $F_R$ を計測・算出する（ステップS33）。これらの結果を基に、足底の接地判定処理を行なう（ステップS34）。

## 【0182】

総床反力 $F$ が正の閾値 $\epsilon$ より大きい場合は、足底が路面に接地していると判断し、ステップS35に進む。ステップS35は倣い判定であり、 $F_L$ 、 $F_R$ のいずれかが正の閾値 $\epsilon$ より小さな場合は、倣いが完了していないと判断し、ステップS36に進む。

10

## 【0183】

ステップS36では、倣い動作を行なわせるため、上記の（式26）に基づく路面傾斜推定値の更新を実行した後、ステップS37へ進む。

## 【0184】

一方、ステップS35において、床反力 $F_L$ 、 $F_R$ ともに $\epsilon$ より大きく、倣い完了との判定がなされた場合は、ステップS36における路面傾斜推定値の更新は不要であり、ステップS37に移行する。

## 【0185】

続いてステップS37では、歩行パターン計画上、現時刻が対象足底を支持脚とする期間に含まれるかどうかの判定を行なう。支持脚期間と判定された場合は、計画通りの接地が実現されているとみなし、1制御周期分の路面形状推定処理を完了する。一方、遊脚期間と判定された場合は、計画値以上の高さの路面に接触したとみなし、ステップS38に移行して、上記の（式27）に基づく路面高さ推定値の更新処理を実行することで、1制御周期分の路面形状推定処理を完了する。

20

## 【0186】

さて、ステップS34の接地判定結果において、無接地状態と判定された場合は、ステップS39に移行して、路面傾斜推定値を計画値に徐々に復帰させるための演算を実行する。続いて、歩行パターン計画上、現時刻が対象足底を支持脚とする期間に含まれるかどうかの判定を行なう（ステップS40）。

## 【0187】

ここで、支持脚期間と判定された場合は、計画値以下の路面高さのため足底が計画したタイミングで着床できない場合と判断し、上記の（式28）に基づく路面高さ推定値の更新処理を実行することで（ステップS41）、1制御周期分の路面形状推定処理を完了する。

30

## 【0188】

一方、ステップS40において遊脚期と判定された場合は、計画通り無接地状態が維持されているとみなし、路面高さ推定値を計画値に徐々に復帰させるための演算を実行した後（ステップS42）、1制御周期分の路面形状推定処理を完了する。

## 【0189】

本実施形態では、環境形状計測手段として足底接地後に足底力センサを用いて環境形状を推定する例を示したが、遊脚期に足底の測距センサ（例えば、図1中D1～D8など）を用いて（非接触で）環境形状を測定したり、視覚機能を用いて環境形状を測定したり、あるいはこれらを協調的に用いるように構成してもよい。

40

## 【0190】

次いで、適応制御機能を追加する第3の例として、さらに外力・外モーメント観測部23を構成する例について説明する。

## 【0191】

ここでは、外力・外モーメント観測部23において、足底垂直方向の1軸力センサを用いて床面上の点 $p$ 回りに作用するモーメントを計測するように構成する。特に、点 $p$ をZMPに採れば、理想的な歩行状態が維持されている場合には、外力モーメント $n$ の出力は

50

0となる。逆に、非ゼロの外力モーメント  $n$  が検出された場合には、ロボットに作用した予定外の外モーメントとみなすことができる。

【0192】

図13には、足底垂直方向の1軸力センサを用いて床面上の点  $p$  回りに作用するモーメントを計測する様子を示している。同図に示すように、足底が床面に対してほぼ水平で、足底の1軸力センサのうち非0荷重を出力しているものがすべて点  $p$  と同一水平面上に存在しているとみなせる状況においては、足底1軸力センサの出力を  $F_i$  ( $i = 1 \cdots 8$ )、各々の力センサの位置を  $P_{Fi}$  ( $i = 1 \cdots 8$ ) とすると、点  $p$  回りに作用するモーメント  $n$  は、近似的に下式を用いて求めることができる。

【0193】

【数28】

$$n = \sum_{i=1}^{i=8} (P_{Fi} - p) \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_i \end{bmatrix} \quad (\text{式29})$$

10

20

【0194】

図14には、足底垂直方向の1軸力センサを用いて床面上の点  $p$  回りに作用するモーメントを計測するための処理手順をフローチャートの形式で示している。

【0195】

まず、足底センサ値  $F_i$  ( $i = 1 \cdots 8$ ) を計測した後（ステップS51）、実時間歩行パターン生成部25で生成された足底位置・姿勢の現在値を基に、足底4端点に取り付けられた力センサの現在位置  $p_{Fi}$  ( $i = 1 \cdots 8$ ) を算出する（ステップS52）。

【0196】

さらに、実時間歩行パターン生成部25より、現在のZMP位置  $p$  を取得する（ステップS53）。

【0197】

最後に、上記の（式29）を用いて、点  $p$  回りのモーメントを算出し（ステップS54）、本処理ルーチンを終了する。

【0198】

こうして推定・算出された外力モーメント  $n$  を、上述したように構成された実時間歩行パターン生成部25の強制項付ZMP方程式に入力することで、第1の実施形態の場合に加えて、外力モーメントに対して適応的に全身運動を再計画して、ロボットを安定に歩行させることが可能となる。

【0199】

以上のように、実世界に係る情報を実時間歩行パターン生成部25に入力することで、ユーザからの運動変更要求に即応的に対応し、既知及び未知環境下においてロボットの歩行の継続を可能とするための全身関節角が出力される。最後に、本全身関節角を参照値として、全身関節駆動部にてPIDコントローラなどを用いて各関節を位置制御することで、所望の運動状態を実現することができる。

【0200】

なお、上述した本発明の実施形態では、状態ベクトル（状態量）として重心位置  $x$ 、重心速度  $dx/dt$  からなる2次元ベクトル  $[x, dx/dt]^T$  を用いる例を示したが、本発明の要旨はこれに限るものではない。例えば、腰部などの重心近傍の特定部位の位置  $p$ 、速度  $dp/dt$  からなる2次元ベクトル  $[p, dp/dt]^T$ 、全身の質点位置  $p_i$ 、

40

50

速度  $dp_i/dt$  ( $i$  は質点のインデックスで、 $i = 1 \cdots N$ ) からなる  $2N$  次元ベクトル  $[p_1, p_2, \dots, p_N, dp_1/dt, dp_2/dt, \dots, dp_N/dt]^T$  などを状態ベクトルとして用いても良い。

【0201】

また、本実施形態では運動方程式として重心に関する ZMP 方程式を用いたが、本発明の要旨はこれに限るものではなく、各リンク質量、重心、慣性モーメントまで考慮した ZMP 方程式、ZMP 方程式が適用されない一般路面・無接地状態を記述可能な一般のロボットの全身に係る運動方程式を用いてもよい。

【0202】

【追補】

以上、特定の実施例を参照しながら、本発明について詳解してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施例の修正や代用を成し得ることは自明である。

【0203】

本発明の要旨は、必ずしも「ロボット」と称される製品には限定されない。すなわち、電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置であるならば、例えば玩具等のような他の産業分野に属する製品であっても、同様に本発明を適用することができる。

【0204】

要するに、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、本明細書の記載内容を限定的に解釈するべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の欄を参酌すべきである。

【図面の簡単な説明】

【0205】

【図1】図1は、本発明の実施に供される脚式移動ロボットの自由度構成を模式的に示した図である。

【図2】図2は、本発明の実施形態に係る脚式移動ロボットに適用される歩行制御システムの機能構成を模式的に示した図である。

【図3】図3は、図2に示した歩行制御システムの処理の流れを示したフローチャートである。

【図4】図4は、実時間歩行パターン生成部25の内部構成を模式的に示した図である。

【図5】図5は、足底の位置・姿勢軌道を示した図である。

【図6】図6は、仮定条件（仮定1）～（仮定3）を満足する短期区間がN区間連なって構成されているとしてモデル化された歩行モデルを示した図である。

【図7】図7は、実時間歩行パターン生成部25における処理の流れを示したフローチャートである。

【図8】図8は、ロボットの機体全体の回転運動によって重心位置偏差が発生している様子を示した図である。

【図9】図9は、重心位置・重心速度を計測するように構成されたロボット状態観測部21における処理動作を示したフローチャートである。

【図10】図10は、路面傾斜の計測方法を示した図である。

【図11】図11は、着床と共に未知路面高さに対して拘束を受けた後、遊脚期にて計画軌道へ徐々に復帰するように実行される足底軌道の様子を示した図である。

【図12】図12は、路面傾斜・路面高さ推定処理の手順をフローチャートの形式で示した図である。

【図13】図13は、足底垂直方向の1軸力センサを用いて床面上の点p回りに作用するモーメントを計測する様子を示した図である。

【図14】図14は、足底垂直方向の1軸力センサを用いて床面上の点p回りに作用するモーメントを計測するための処理手順を示したフローチャートである。

【符号の説明】

10

20

30

40

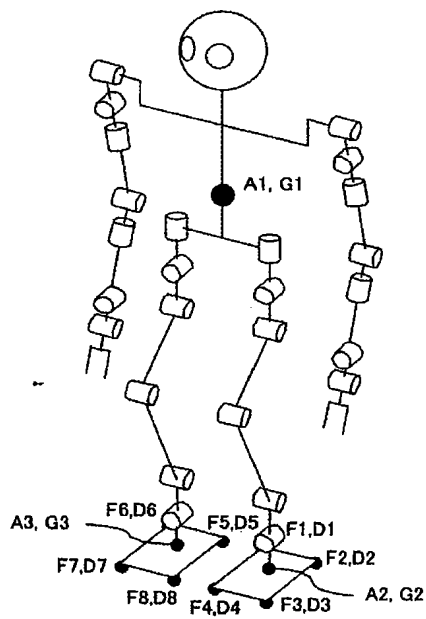
50

## 【0206】

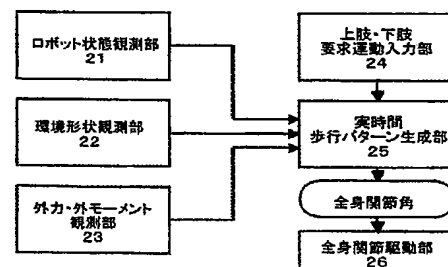
- 21…ロボット状態観測部
- 22…環境形状観測部
- 23…外力・外モーメント観測部
- 24…上肢・下肢要求運動入力部
- 25…実時間歩行パターン生成部
- 26…全身関節駆動部
- 41…足底位置・姿勢軌道生成部
- 42…ZMP方程式求解部
- 43…質点分布調整部
- 44…関節角算出部
- 45…現在状態決定部

10

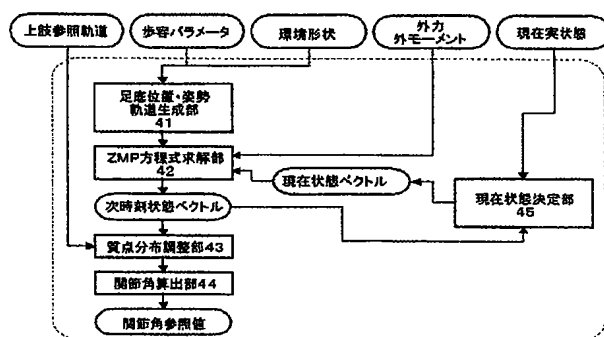
【図1】



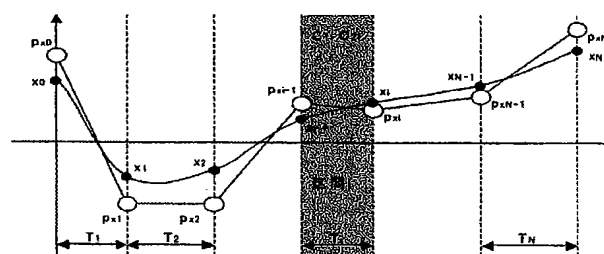
【図2】



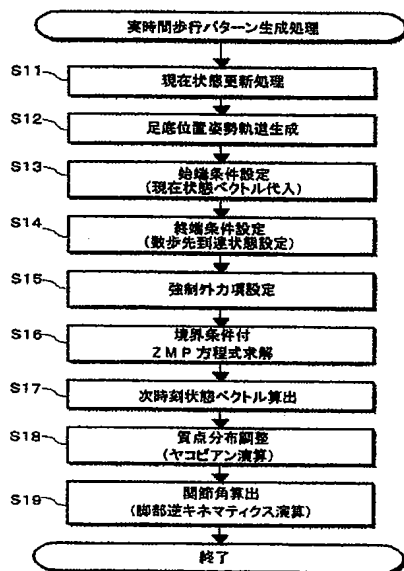
【图 4】



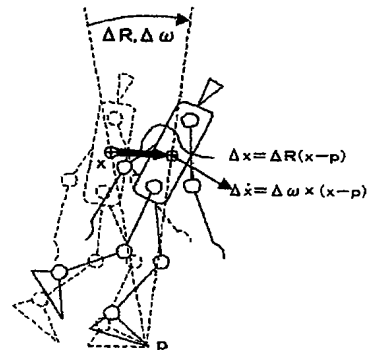
【図 6】



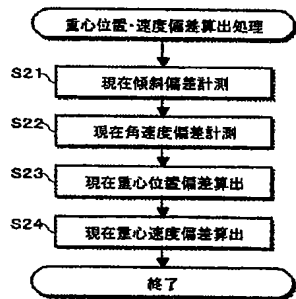
【図 7】



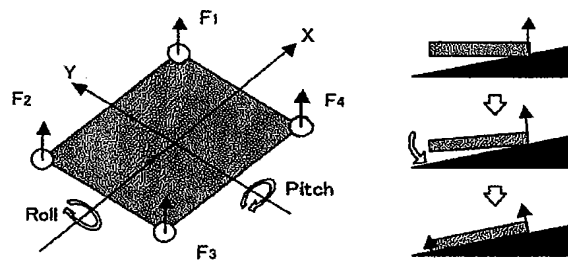
【図 8】



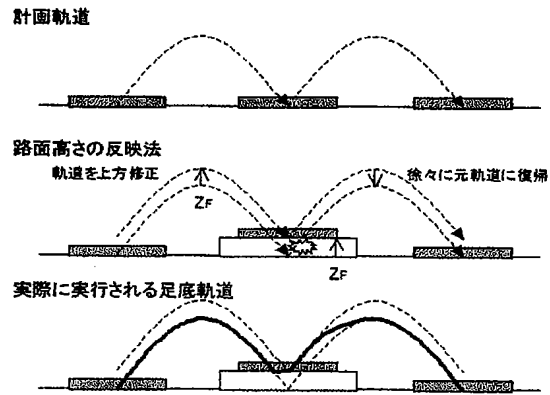
【図 9】



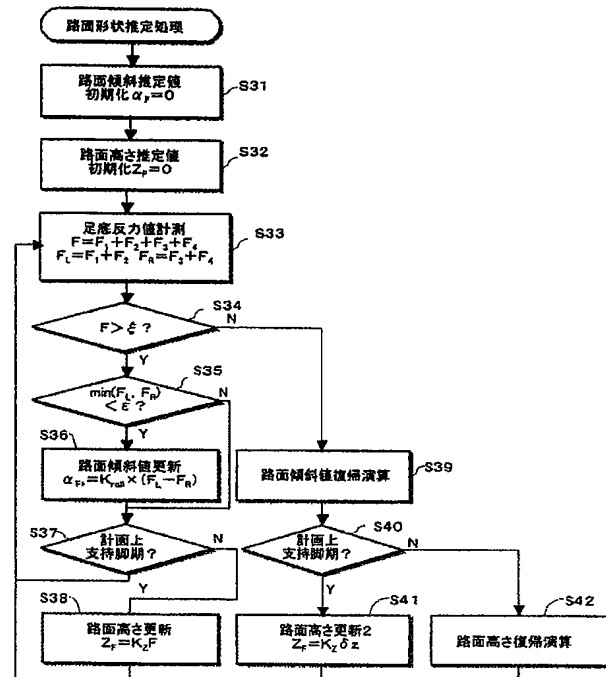
【図 10】



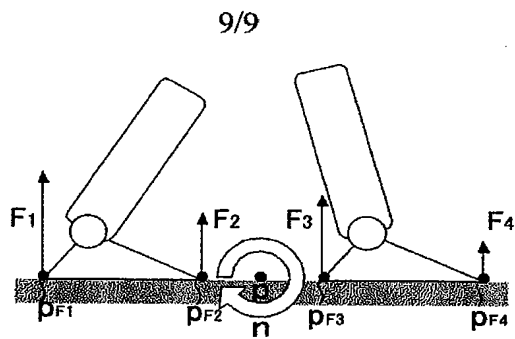
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】

